

Geometrie in flüssigen Strukturen dieser Art zeigt nun [1], dass hier zwei grundlegende Aspekte des Systems zusammenwirken. Zum einen versucht die Flüssigkeit, die die Körner benetzen will, mit so großer Präferenz die Kontaktstellen auf, dass ein großer Teil des Raumes zwischen den Körnern leer bleibt. Das Wasser verteilt sich also nicht gleichmäßig zwischen den Kügelchen, sondern es bildet sich ein inniges Gewebe aus Körnern, Flüssigkeit und Luft. Die flüssigen Strukturen sehen aus wie Kapillarbrücken, die lediglich an ihren äußersten Rändern „zusammengeklebt“ sind.

Zum anderen sorgt die Geometrie dieser Kapillarbrücken, die einen wohldefinierten Benetzungswinkel mit der Kornoberfläche bilden, für

einen ebenfalls wohldefinierten Laplace-Druck innerhalb der flüssigen Cluster. Der Laplace-Druck ist das Produkt aus der mittleren Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche und deren Oberflächenspannung und definiert die „Steifigkeit“ des Granulats. Er ist aber allein durch die Korngröße, die Oberflächenspannung und den Benetzungswinkel festgelegt. Außerdem bleibt die benetzte Fläche ebenfalls unverändert, weil sie im Wesentlichen durch die Fläche der einzelnen Kapillarbrücken gegeben ist. Daraus resultiert, dass auch die Kraft, die das Gefüge zusammenhält, weitgehend unabhängig vom Flüssigkeitsgehalt ist.

Die Untersuchungen brachten noch ein weiteres, nicht minder erstaunliches Ergebnis: für unregel-

mäßig geformte Körner gilt qualitativ dasselbe wie für kugelförmige, was die Relevanz der Untersuchung für die Praxis noch unterstreicht. Diese vom Wassergehalt unabhängige Steifigkeit von Granulaten ist für die Pharma- und Lebensmittelindustrie also ebenso relevant wie für das Verständnis mancher Naturkatastrophen, zum Beispiel für Erdbeben. In diesen Fällen hat man es mit feuchten Granulaten zu tun, deren mechanische Eigenschaften wir nun besser zu verstehen glauben.

Literatur

[1] M. Scheel et al., *Nature Mat.* **2008**, 7, 189.

*Stephan Herminghaus,
Max-Planck-Institut für Dynamik
und Selbstorganisation, Göttingen.*

RASTERKRAFTMIKROSKOPIE

Wie viel Kraft ist nötig, um ein Atom zu bewegen?

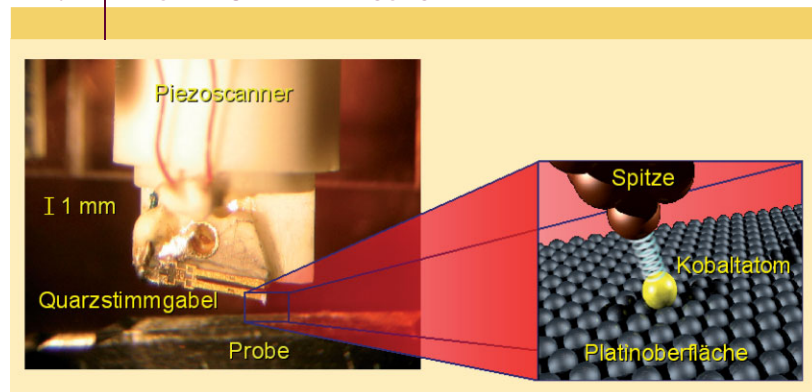
Bei mechanischen Konstruktionen benötigt man umfassendes Wissen über die Kräfte, die zwischen den Bauteilen wirken. Zum Beispiel ist es wichtig zu wissen, wie viel Kraft man aufwenden muss, um zwei Einzelteile gegeneinander zu verschieben. Dies trifft auch auf der atomaren Ebene zu. Einer Forschergruppe bei IBM in Kalifornien ist es jetzt zum ersten Mal gelungen, die Kräfte zu messen, die nötig sind, um Atome oder Moleküle auf einer Kristalloberfläche zu bewegen [1].

Atome und Moleküle gehen miteinander Wechselwirkungen ein, bilden stabile Strukturen und formen die belebte und unbelebte Natur. Oberflächen spielen dabei eine Schlüsselrolle, da sowohl viele chemische Reaktionen als auch der Aufbau komplexerer Strukturen an ihnen stattfindet.

Seit fast zwanzig Jahren können wir nun schon Atome und Moleküle präzise auf Oberflächen positionieren [2], neuartige Strukturen aufbauen und deren Eigenschaften studieren. In den meisten Fällen wird dazu die Spitze eines Rastertunnelmikroskops (RTM) so dicht an das Atom gebracht, dass atomare Wechselwirkungen eine Kraft auf das Atom ausüben. Dann kann es von einem Absorptionsplatz auf der Oberfläche zu einem benachbarten Bindungsplatz springen.

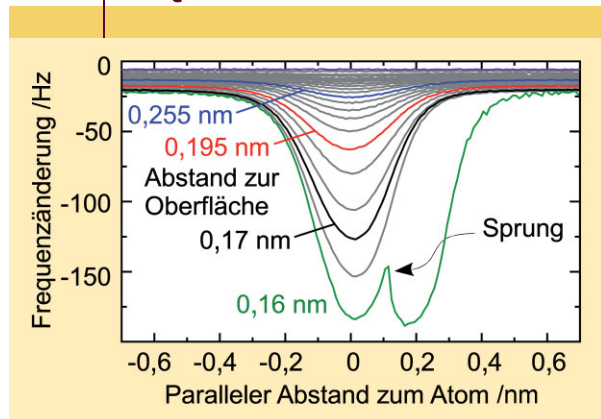
Das RTM basiert auf dem quantenmechanischen Tunnelstrom zwischen der Spitze und der Probe und ist deshalb prinzipiell nicht in der Lage, Aussagen über die involvierten Kräfte zu machen. Ein Rasterkraftmikroskop misst dagegen direkt die Kraft zwischen Spitze und Probe über ihre Wirkungen auf einen

ABB. 1 | RASTERTUNNELMIKROSKOP



Das Rastertunnelmikroskop mit Kraftsensor. Die Spitze fährt mit abnehmendem Abstand über ein einzelnes Atom auf der Probe, bis dieses zu einem benachbarten Bindungsplatz springt.

ABB. 2 FREQUENZÄNDERUNG



Aus der Frequenzänderung der Stimmgabel als Funktion der lateralen und vertikalen Position der Spitze in Bezug auf das Atom auf der Oberfläche können wir die beteiligten vertikalen und lateralen Kräfte bestimmen.

Federbalken, der die Spitze trägt. Wir haben nun die Metallspitze unseres RTMs auf einen Federbalken montiert, der empfindlich genug ist, um extrem kleine Kräfte zu messen. Gleichzeitig ist er so steif, dass seine Bewegung durch die bei den Atommanipulationen wirkenden Kräfte nur unwesentlich gestört wird.

Als Kraftsensor benutzen wir eine Stimmgabel aus Quarz, ähnlich dem Frequenznormal im Schwingkreis von elektrischen Armbanduhr. Eine Zinke der Stimmgabel ist dabei fest mit dem Piezoscanner des Mikroskops verbunden, während an der anderen eine metallische Spitze befestigt ist (Abbildung 1).

Die Stimmgabel schwingt mit einer sehr kleinen Amplitude von

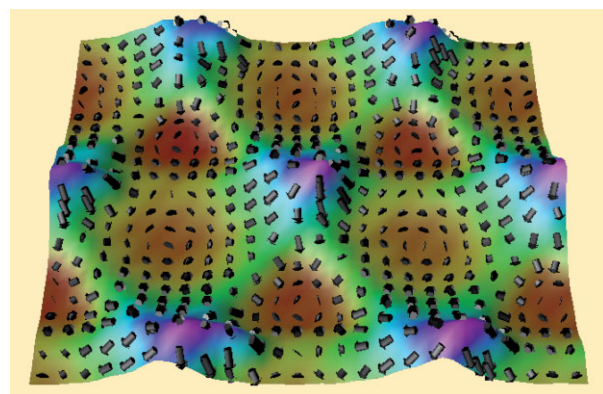


Abb. 3 Aus der Bewegung eines einzelnen Kobaltatoms auf einer Kupferoberfläche lässt sich die Potentiallandschaft ermitteln. Die Länge der Pfeile kodiert die Parallelkräfte, die auf die Spitze wirken.

30 Pikometer ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$) bei einer Frequenz von ungefähr 21000 Hz und bewegt das Spitzenende periodisch näher an die Probe. Ändert sich während eines Schwingungszyklus die Kraft zwischen Spitze und Probe, so verändert sich die Resonanzfrequenz der Stimmgabel. Um die Kraft zu bestimmen, die nötig ist, um ein Atom über eine Oberfläche zu bewegen, führen wir die Spitze parallel über das adsorbierte Atom und messen die Frequenzverschiebung. Diesen Vorgang wiederholen wir in verschiedenen Höhen, bis das Atom zum benachbarten Bindungsplatz springt (Abbildung 2).

Aus den so gewonnen Daten können wir die Kraftkomponenten senkrecht und parallel zur Probenoberfläche berechnen. Wir finden, dass eine Parallelkraft von 210 Pikonewton (pN) ausreicht, um ein Kobaltatom über eine glatte Platinoberfläche (Pt(111)) zu bewegen. Zu unserer Überraschung ist diese laterale Kraft unabhängig von der senkrecht an dem Atom wirkenden vertikalen Kraftkomponente.

Die benötigte Kraft hängt dabei sowohl von der Oberfläche als auch von der bewegten Atom- oder Molekülsorte ab. So beträgt die Parallelkraft, um ein Kobaltatom über eine kristallographisch zum Platin identische Kupferoberfläche zu bewegen, nur 17 pN. Ein kleines Molekül wie Kohlenmonoxid benötigt dagegen 160 pN auf der gleichen Kupferoberfläche.

Unsere Technik ermöglicht es außerdem, die komplette Potentiallandschaft aufzunehmen, die die Spitze durchquert, wenn sie ein Atom oder Molekül über die Oberfläche verschiebt (Abbildung 3). Diese Potentiallandschaften erlauben es, weitergehende Aussagen über Atommanipulationen zu machen. So bindet zum Beispiel Kobalt auf Kupfer (Cu(111)) nicht an jedem zwischenatomaren Lückenplatz mit der gleichen Bindungsenergie. Jeder zweite Bindungsplatz ist instabil und nur durch die Wechselwirkung mit

der Spitze kann das Kobaltatom dort stabilisiert werden. Die Unterschiede in der Bindungsenergie können wir direkt aus der Potentiallandschaft ablesen.

Mit dieser Technik ist es nun möglich, grundlegende Fragen zur Konstruktion künstlicher Moleküle und Atomanordnungen auf atomarer Ebene zu beantworten. Außerdem ermöglicht diese neue Messmethode ein tieferes Verständnis der fundamentalen Prozesse in Reibung und Diffusion auf atomarer Länge.

- [1] M. Ternes et al., Science **319**, 1066 (2007).
- [2] D. M. Eigler, E. K. Schweizer, Nature **344**, 524 (1990).

Markus Ternes, Andreas J. Heinrich, IBM Almaden Research Center, San Jose, Kalifornien; Franz J. Giessibl, Universität Regensburg

MATERIALIEN

Nanoblätter

Einer Forschergruppe der Universitäten Bielefeld und Heidelberg sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ist es gelungen, monolagige Nanoblätter herzustellen. Diese Blätter bilden 1 bis 2 nm dünne Membranen mit der Dicke eines einzelnen Moleküls. Sie basieren auf vernetzten, selbstorganisierenden Schichten aus Biphenyl-Molekülen, die sich von ihrem Substrat ablösen lassen und als freistehendes Nanomaterial stabil sind. Die Forscher wollen nun die mechanischen Eigenschaften wie Moduli, Zugfestigkeiten und Resonanzfrequenzen untersuchen. Auch die elektrischen und chemischen Eigenschaften sollen charakterisiert werden.

Mögliche Anwendungen dieser Nanoblätter könnten ultradünne, elektronentransparente Substrate für hochauflösende Transmissions-Elektronenmikroskopie, hochempfindliche Gassensoren oder elektrisch leitfähige Nanoschichten sein.

www.physik.uni-bielefeld.de/pss/sheet.html